

物質の力学的性質（2）

岩石の弾性・流動・破壊

渡邊 （2019/7/10）

前回：物質の力学的性質（１）

弾性，塑性，破壊

- ．．．岩石にも適用できる
- ．．．地球科学は材料科学の知見を基礎に地球を理解してきた

地球の内部構造

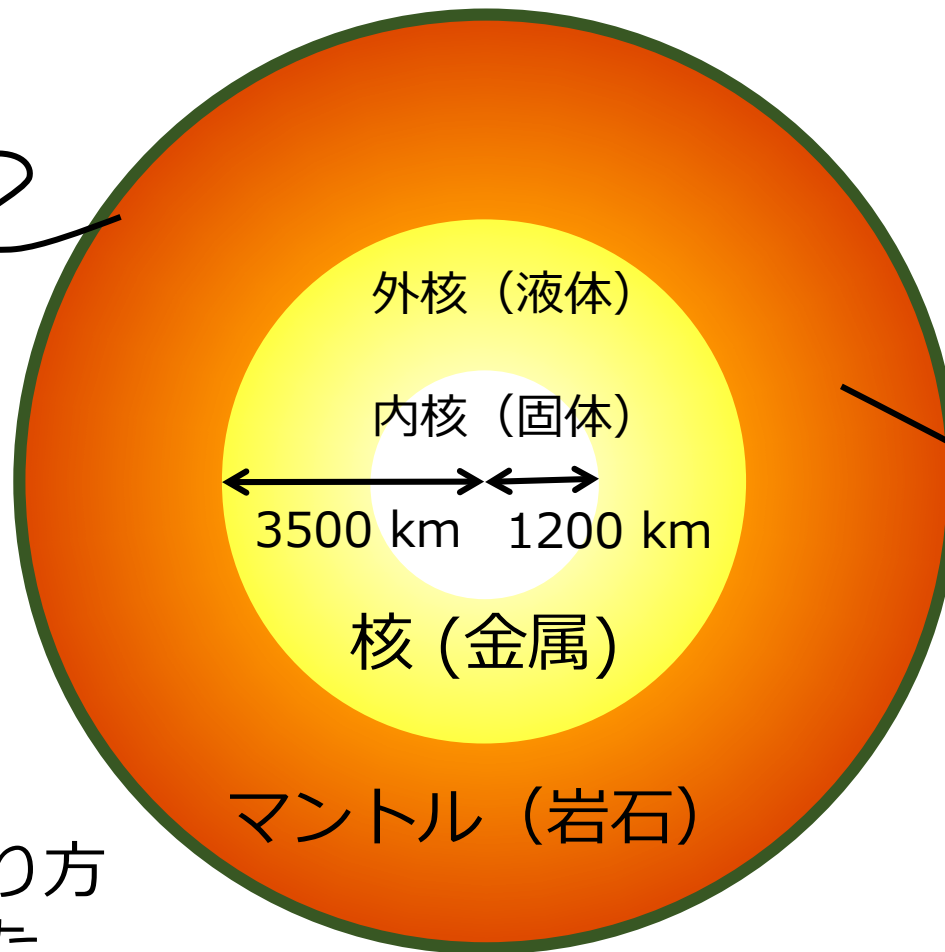
半径 : 6400 km

地殻 (岩石) 厚さ : 10~100 km

地震
⇒ 破壊

地震波
⇒ 弾性変形

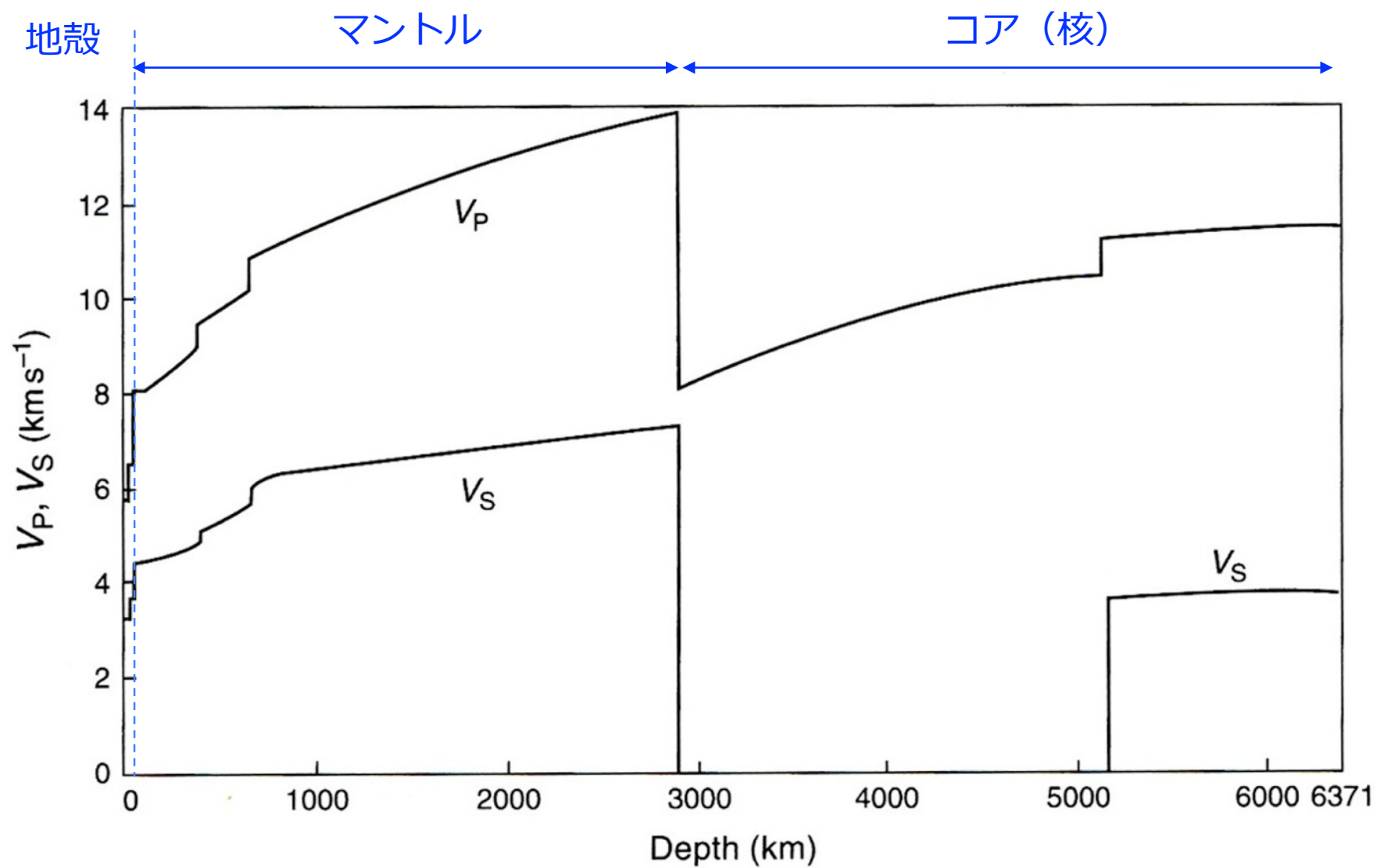
内部構造は
地震波の伝わり方
から推定された



マントル対流
⇒ 塑性変形

球対称地球モデル

IASP91



地球の内部構造

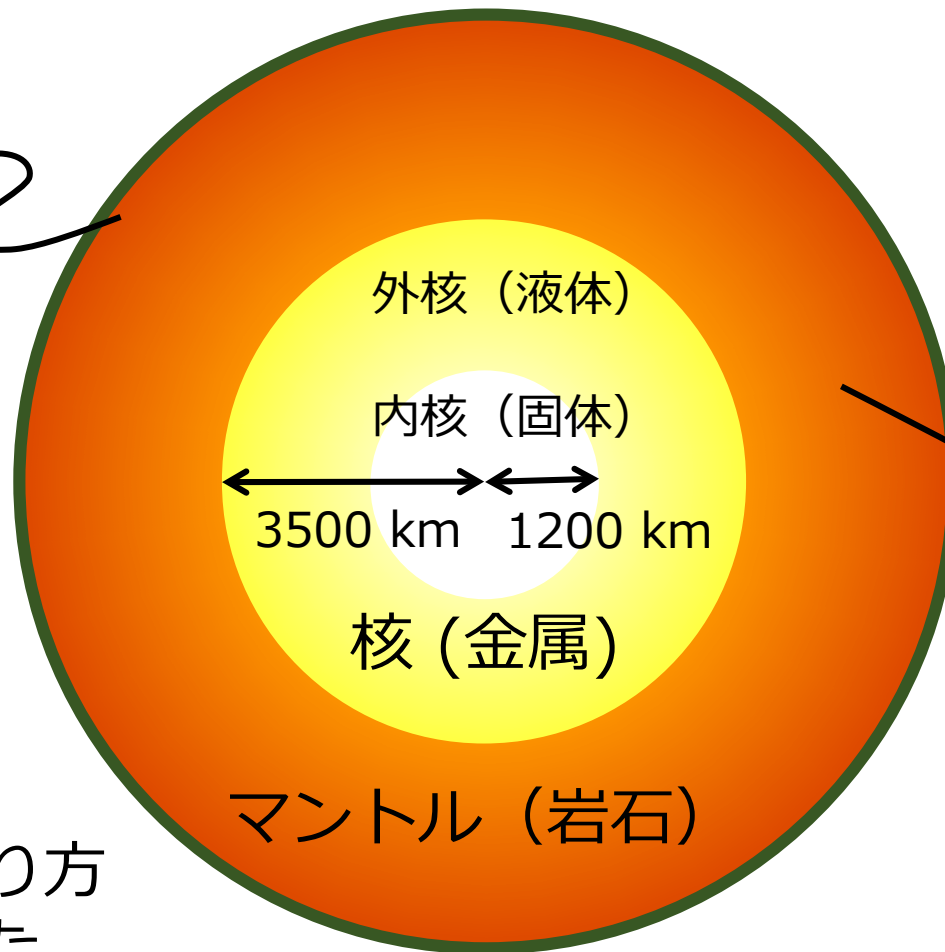
半径 : 6400 km

地殻 (岩石) 厚さ : 10~100 km

地震
⇒ 破壊

地震波
⇒ 弾性変形

内部構造は
地震波の伝わり方
から推定された



マントル対流
⇒ 塑性変形

外核

なぜ液体と言えるのか？

液体とは

どのようなものか？

液体とは どのようなものか？

自らは形を保てない

入れ物の形に従う

原子，分子レベルで考えると

固体と液体の違いは何か？

原子，分子レベルで考えると

固体と液体の違いは何か？

固体： 原子間の結合が強く，規則的な構造をもつ
(例外：アモルファス)

液体： 原子あるいは分子間の結合が弱く，規則的な構造をもたない

液体：剪断に対して反発しない

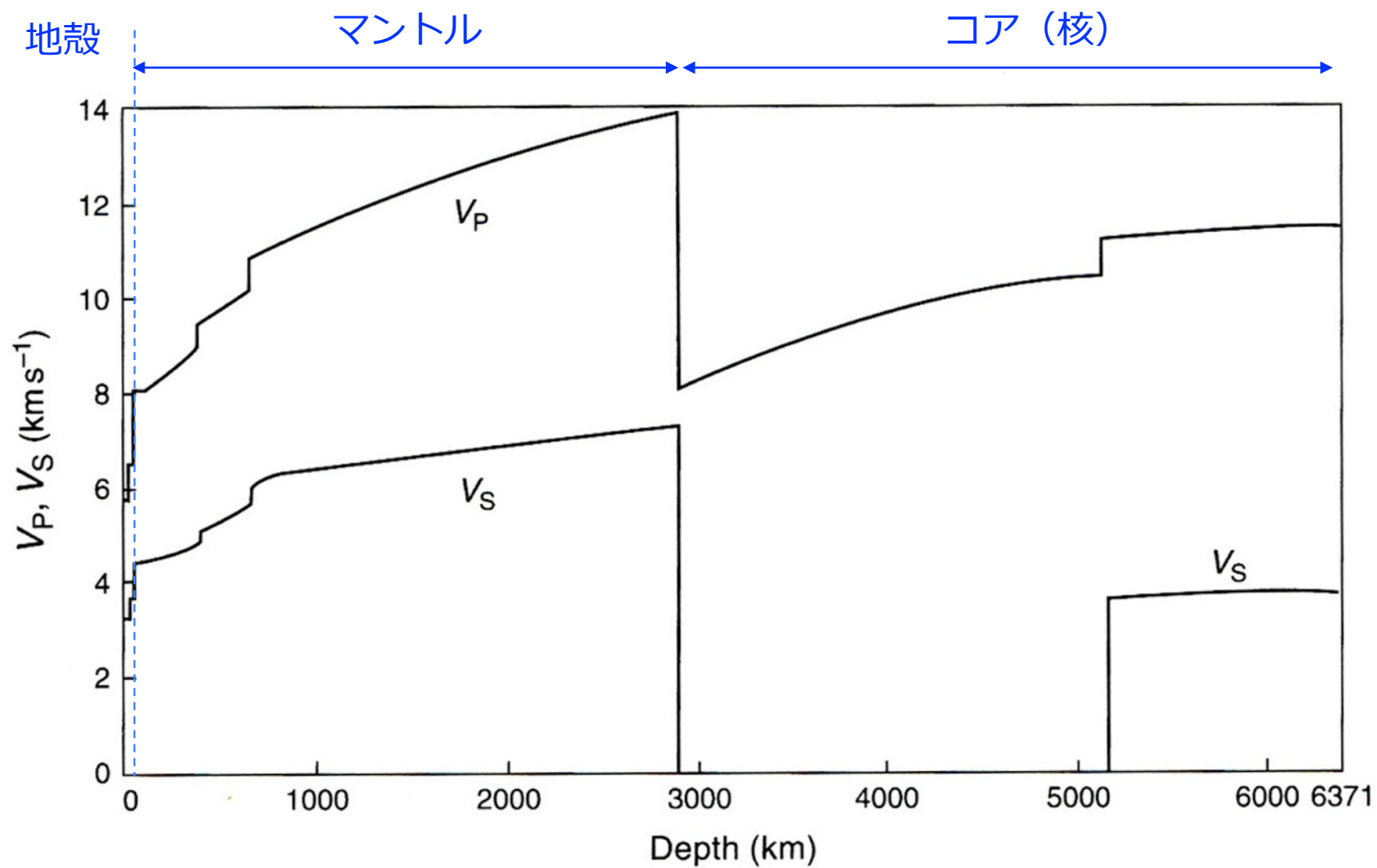
剛性率（剪断弾性率）：ゼロ

⇒ 横波（剪断波）は伝わらない

**※縦波（粗密波）は固体，液体とも
伝わる**

球対称地球モデル

IASP91



金属と岩石

どのような違いがあるか？

应力

塑性变形

破断
延性破坏

弹性变形

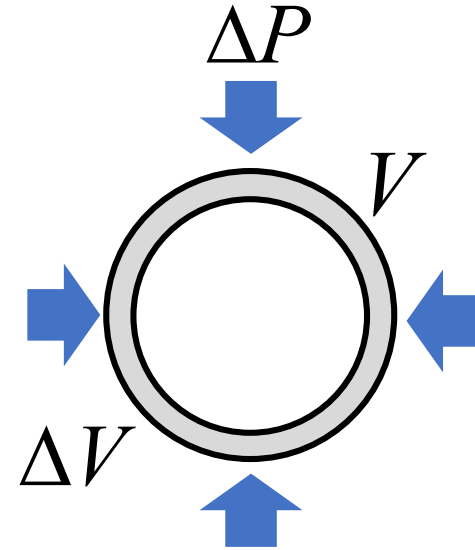
歪



弾性定数の定義

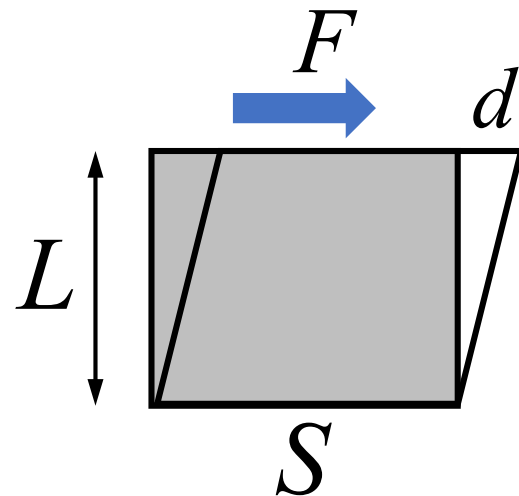
体積弾性率

$$\Delta P = K \frac{\Delta V}{V}$$



剛性率

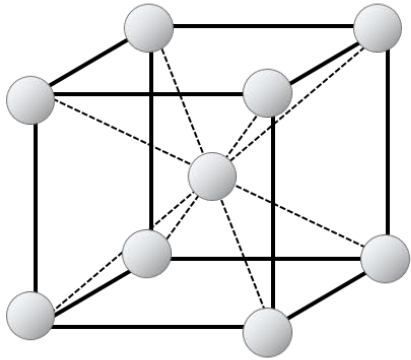
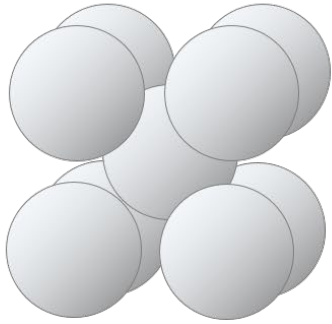
$$\tau = \frac{F}{S} = G \frac{d}{L}$$



弾性定数 (常温常圧)

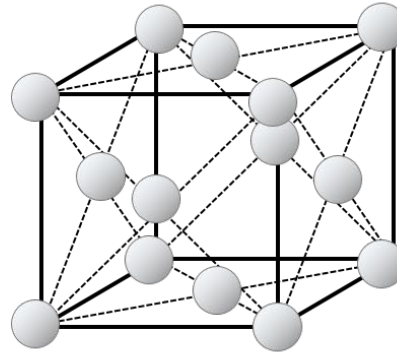
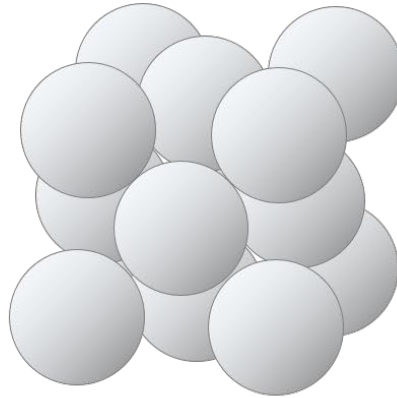
物質	体積弾性率 (GPa)	剛性率 (GPa)
α -Fe	166.7	81.5
Cu	137.3	46.9
Al	75.5	26.1
石英 (SiO_2)	37.8	44.3
カンラン石 (Mg_2SiO_4)	129.5	81.1
輝石(MgSiO_3)	107.8	75.7
Ice (H_2O)	8.72	3.48
Diamond (C)	443.0	535.7

結晶構造（金属）



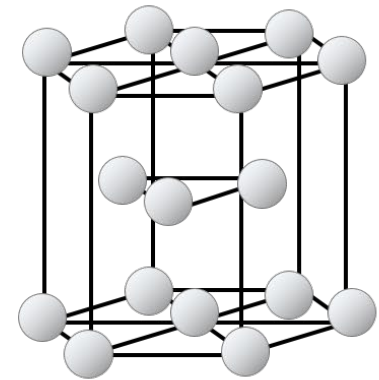
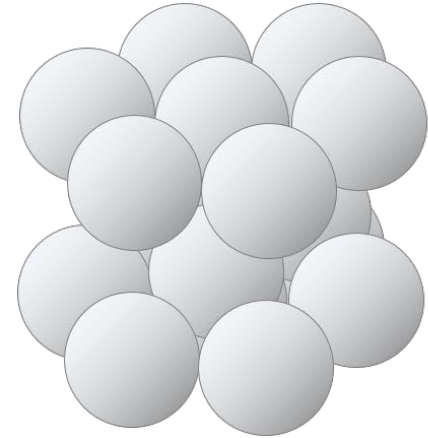
(1) 体心立方格子

α -Fe, W, Mo



(2) 面心立方格子

Al, Cu, Ni, Au,
 γ -Fe



(3) 六方最密格子

Mg, Ti, Zn, Cd

岩石を構成する鉱物の構造

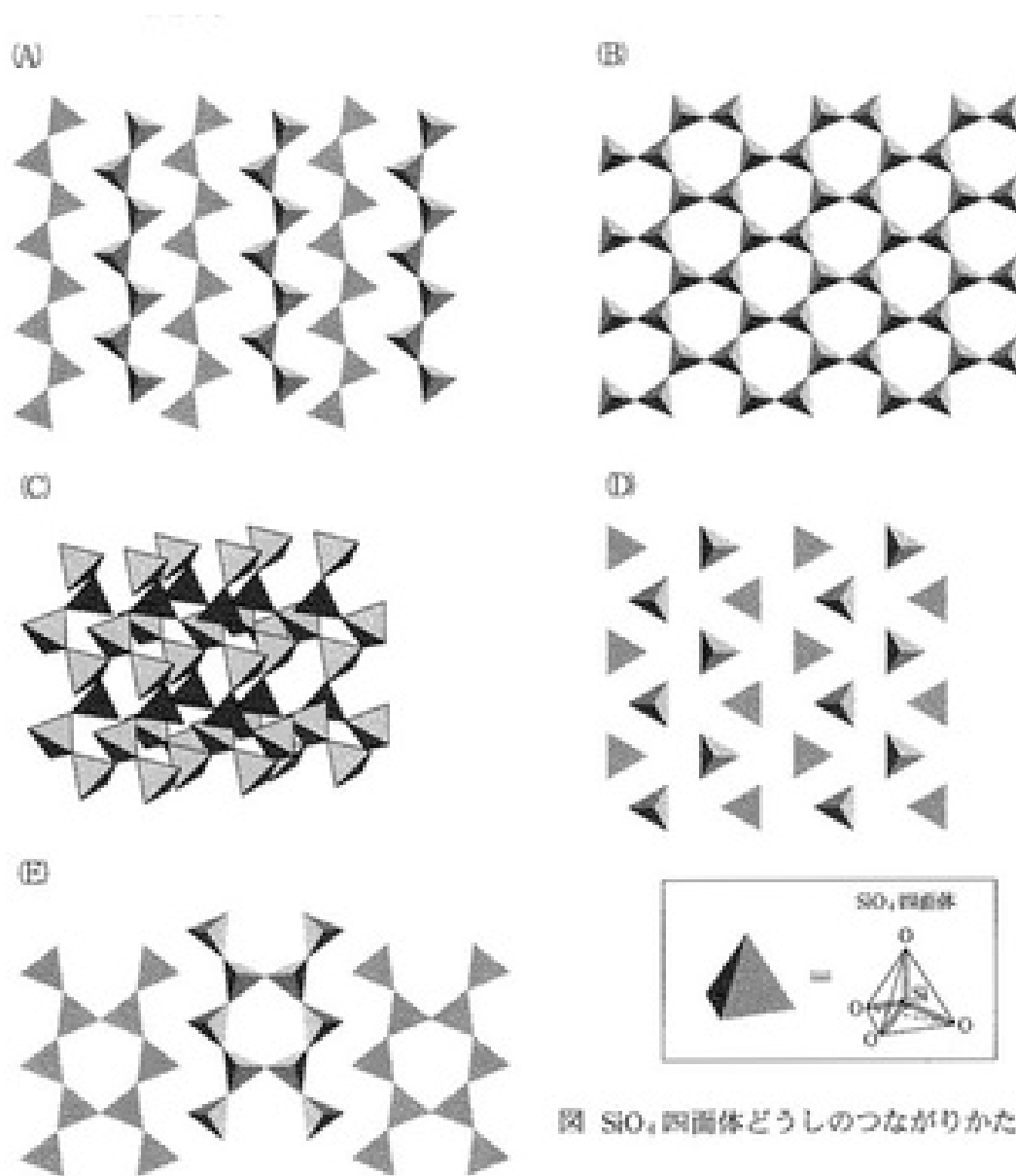
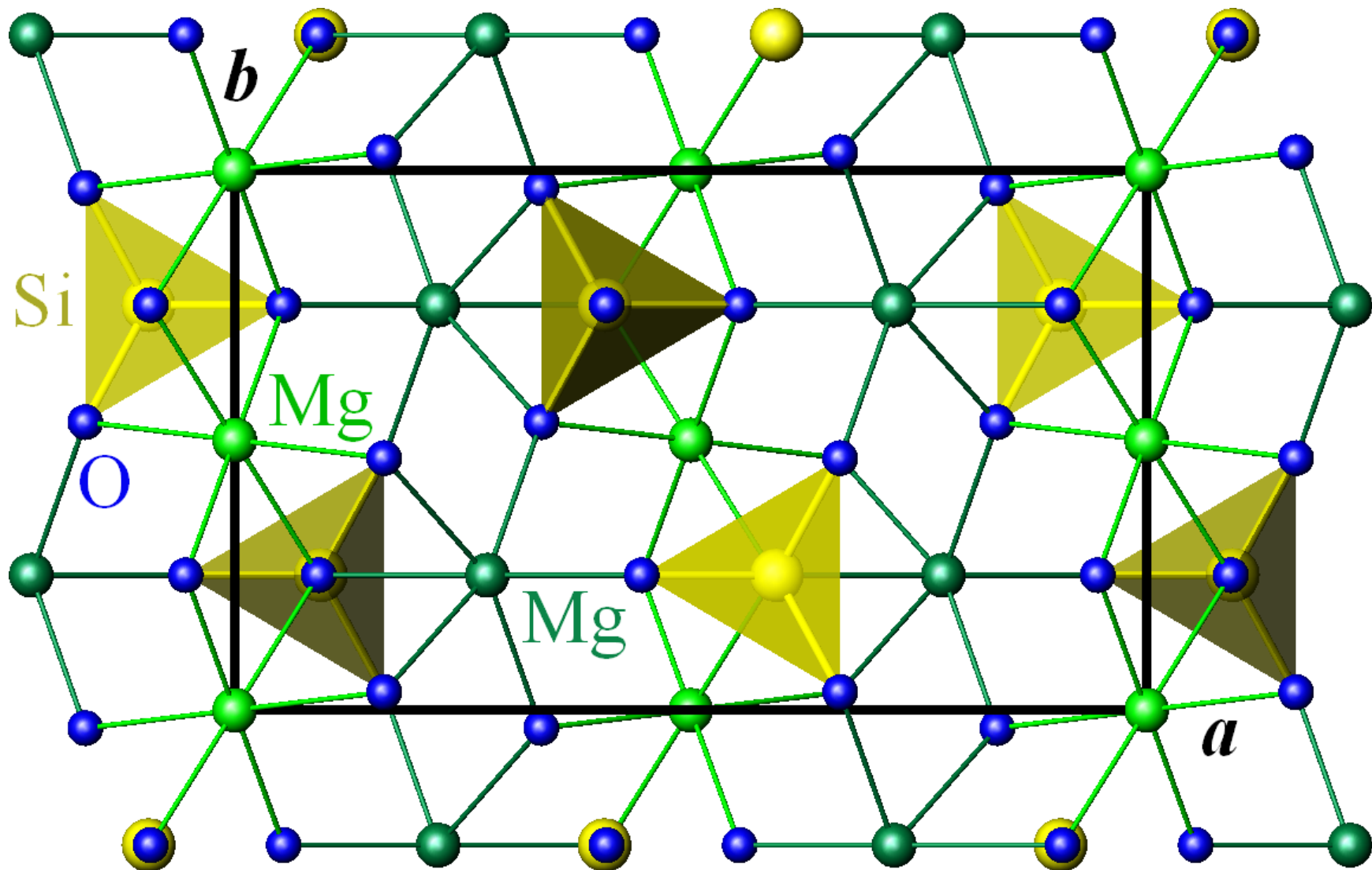


図 SiO₄四面体どうしのつながりかた

カンラン石の結晶構造

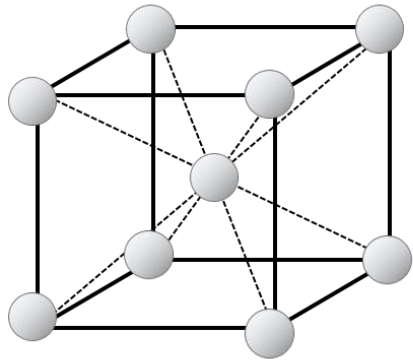
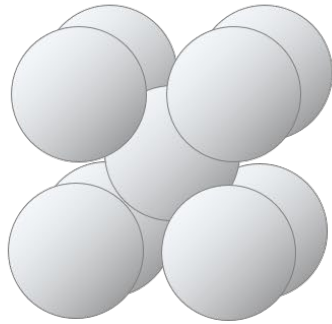


金属と岩石

どのような違いがあるか？

金属に比べてケイ酸塩鉱物は
一般に異方性が強い

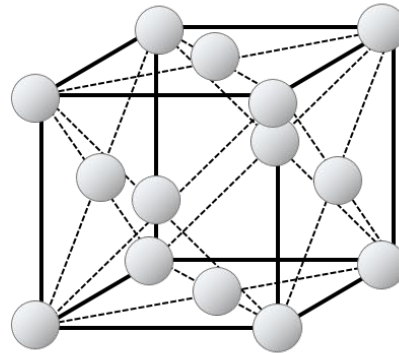
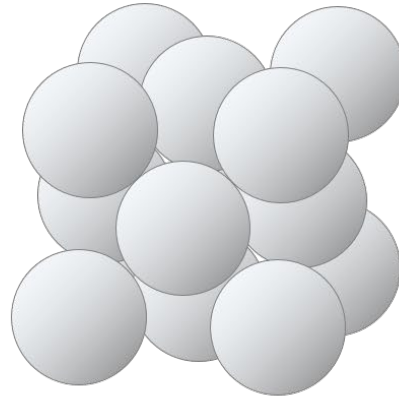
金属の結晶構造



(1) 体心立方格子

α -Fe

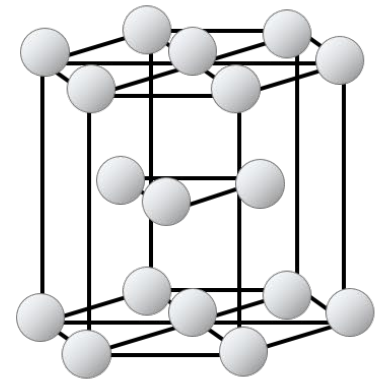
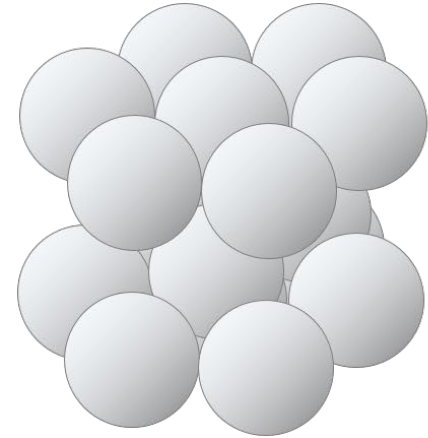
$C_{11}=230$ (GPa)



(2) 面心立方格子

Cu

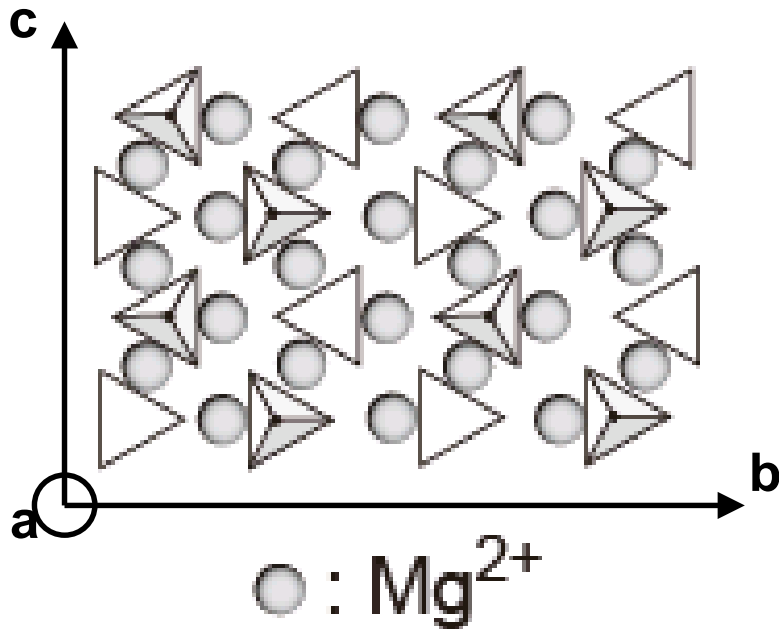
$C_{11}=169$ (GPa)



(3) 六方最密格子

カンラン石の結晶構造

カンラン石 Mg_2SiO_4



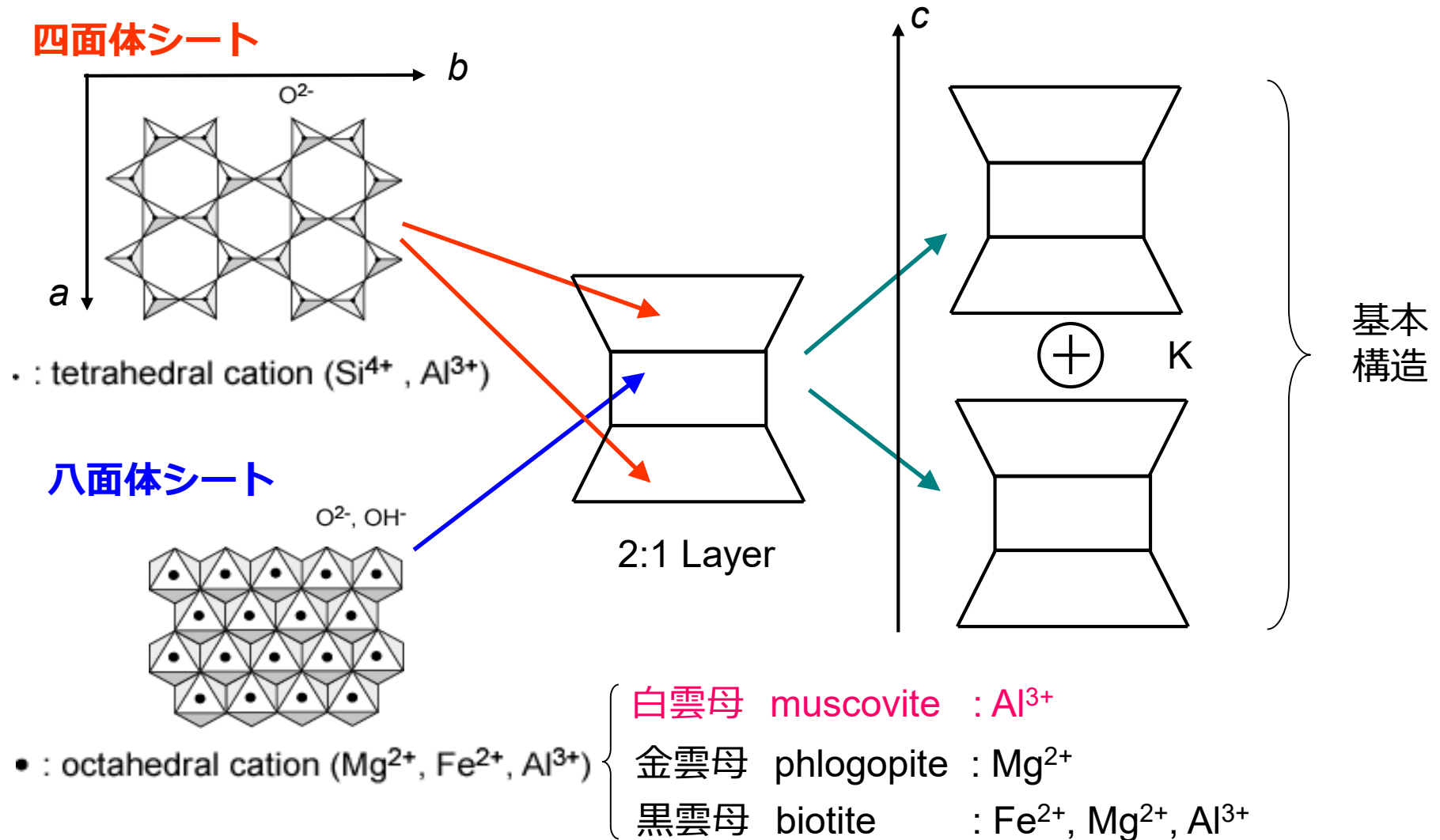
$$C_{11} = 328$$

$$C_{22} = 200$$

$$C_{33} = 235$$

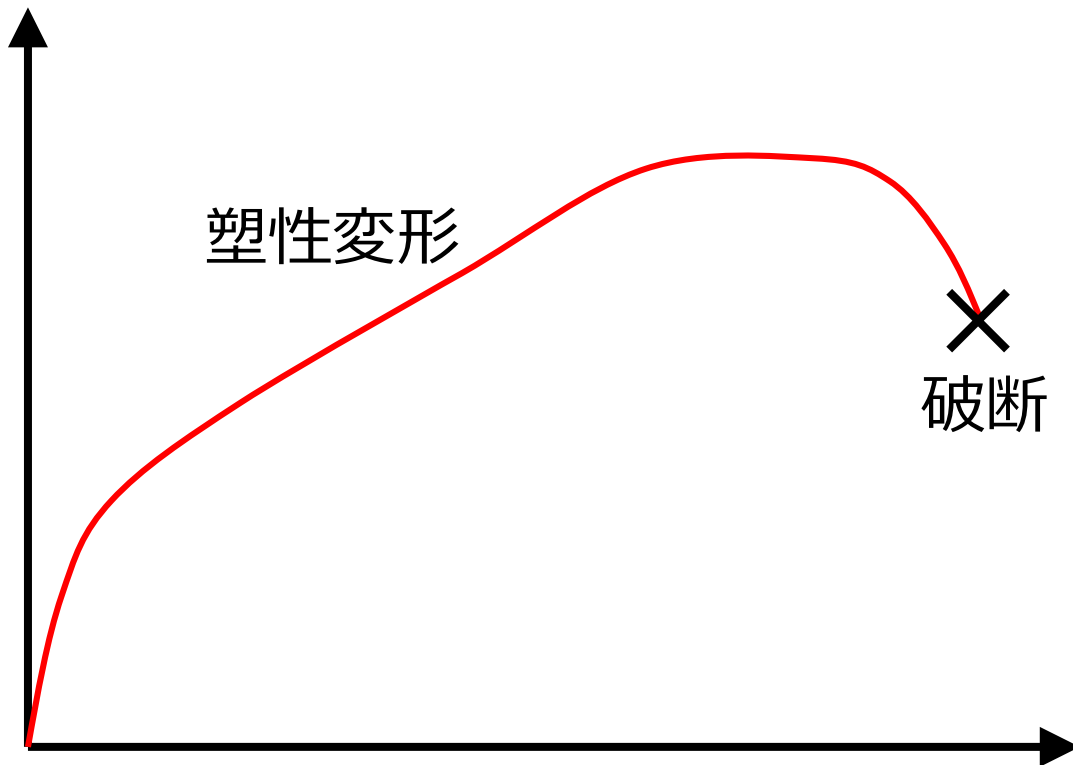
in GPa

雲母族鉱物の構造



$$C_{11} = 184.3, C_{22} = 178.9, C_{33} = 59.1 \text{ (GPa)}$$

应力



塑性变形

破断

弹性变形

应变



伸びやすさ

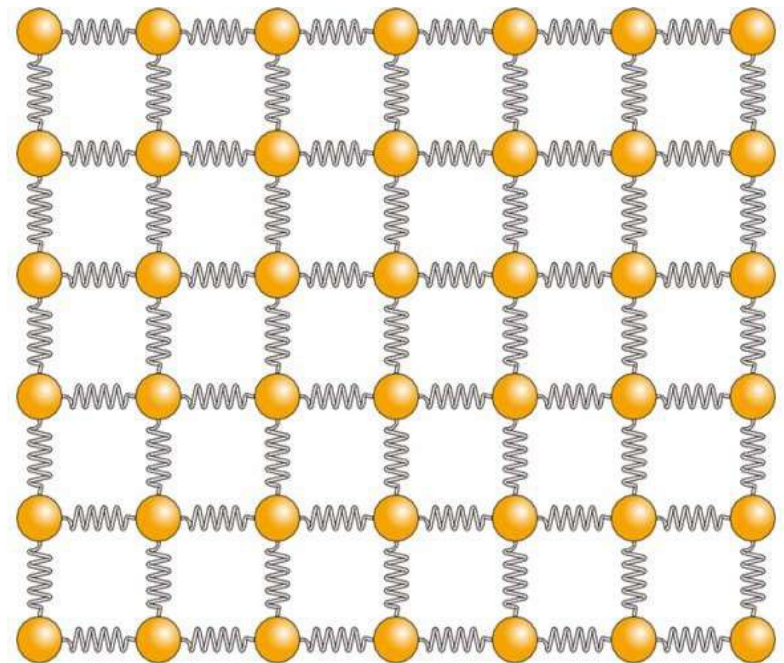
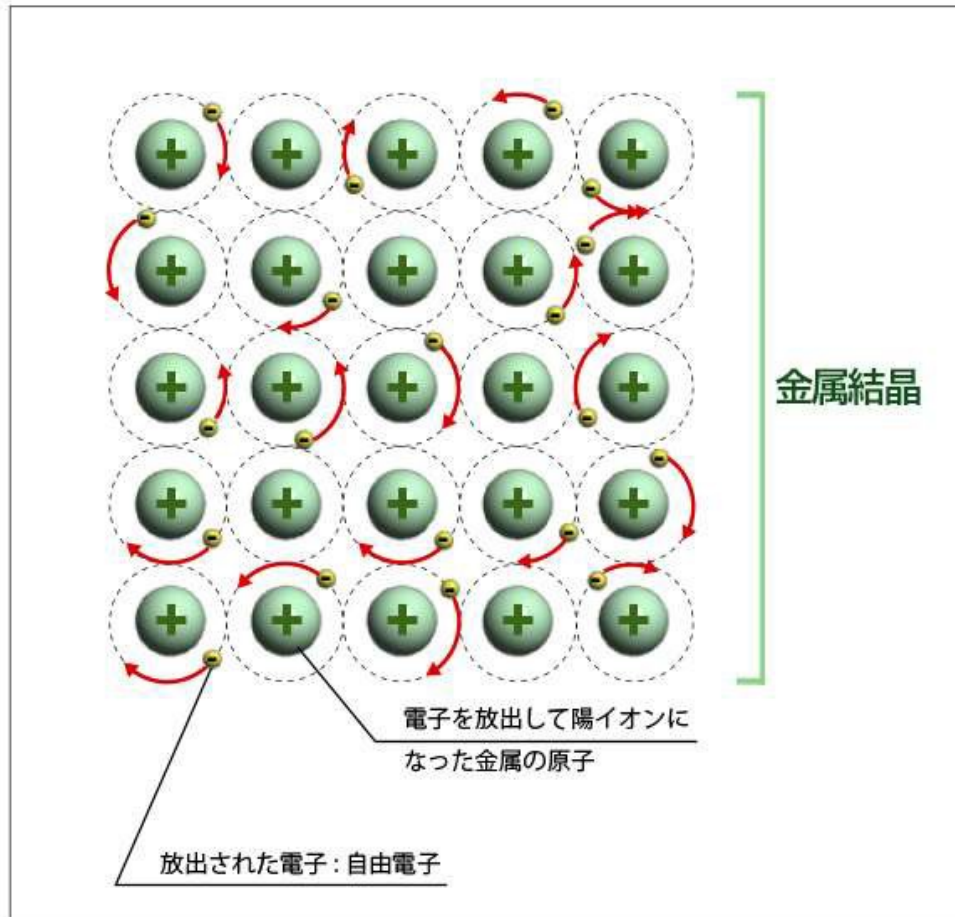
金属 vs 岩石

金属に比べて岩石は伸びにくい

金属に比べて岩石は伸びにくい

⇒ なぜだろうか？

金属が伸びる理由



塑性変形のメカニズム

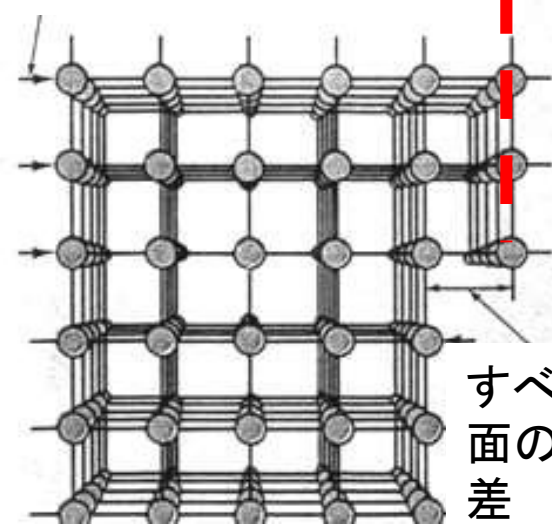
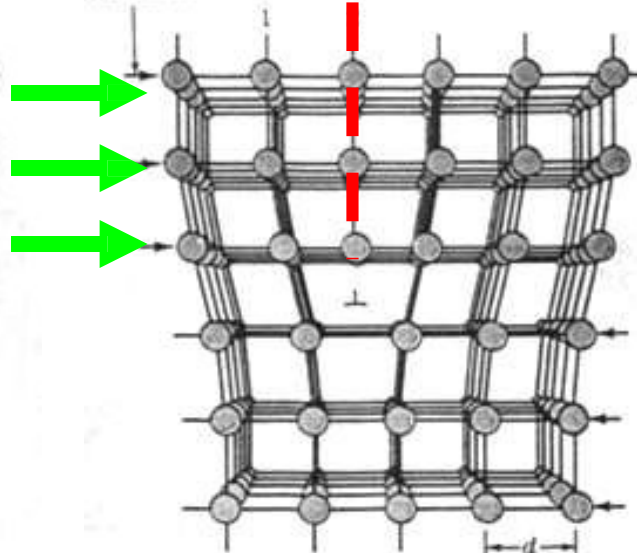
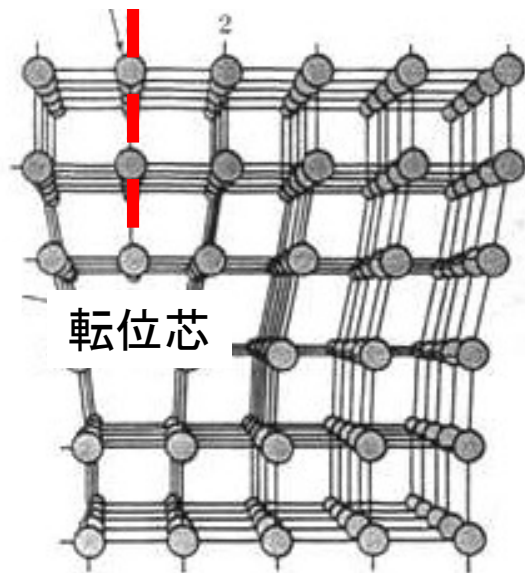
⇒ 転位クリープ

欠陥（弱いところ）を
ずらす

余剰な原子面

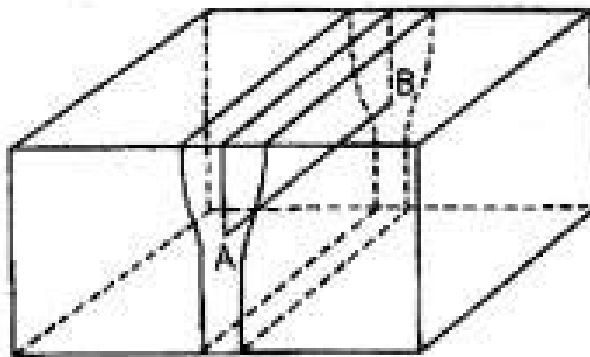
せん断応力

せん断応力



b: バーガースベクトル

刃状転位

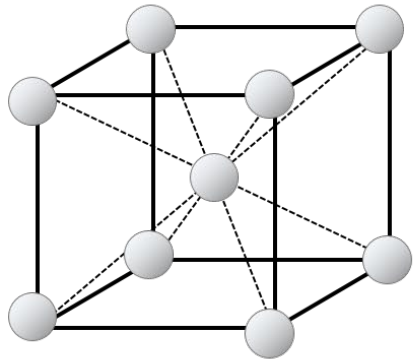
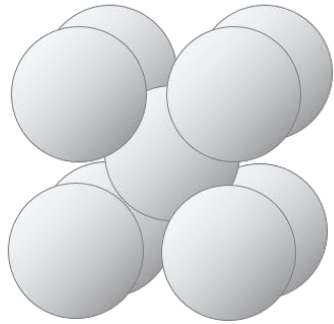


金属に比べて岩石は伸びにくい

⇒ なぜだろうか？

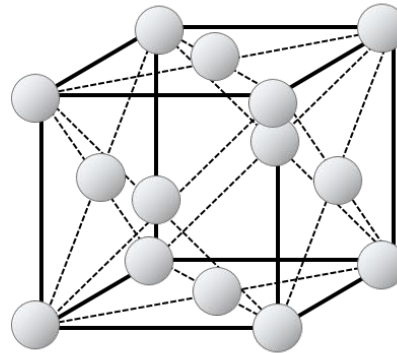
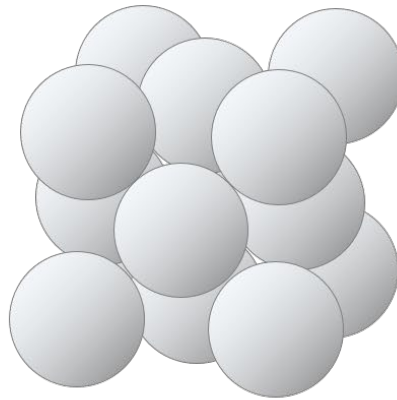
ケイ酸塩鉱物の結晶構造は
金属結晶に比べて複雑
繰り返しの周期が長い
たくさんずらす必要がある

結晶構造（金属）



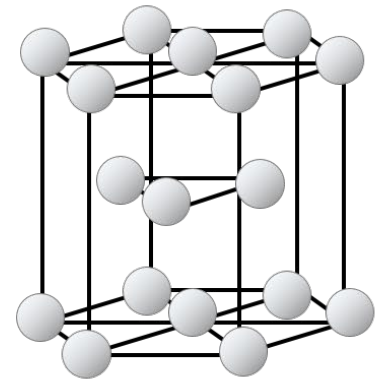
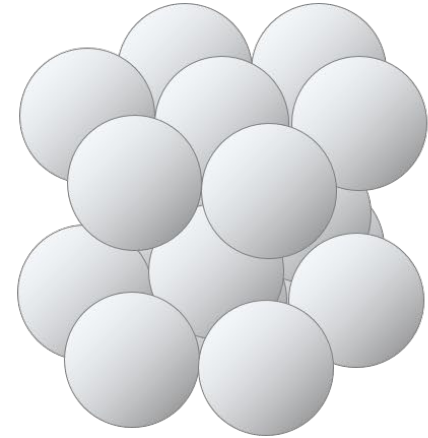
(1) 体心立方格子

α -Fe, W, Mo



(2) 面心立方格子

Al, Cu, Ni, Au,
 γ -Fe



(3) 六方最密格子

Mg, Ti, Zn, Cd

岩石を構成する鉱物の構造

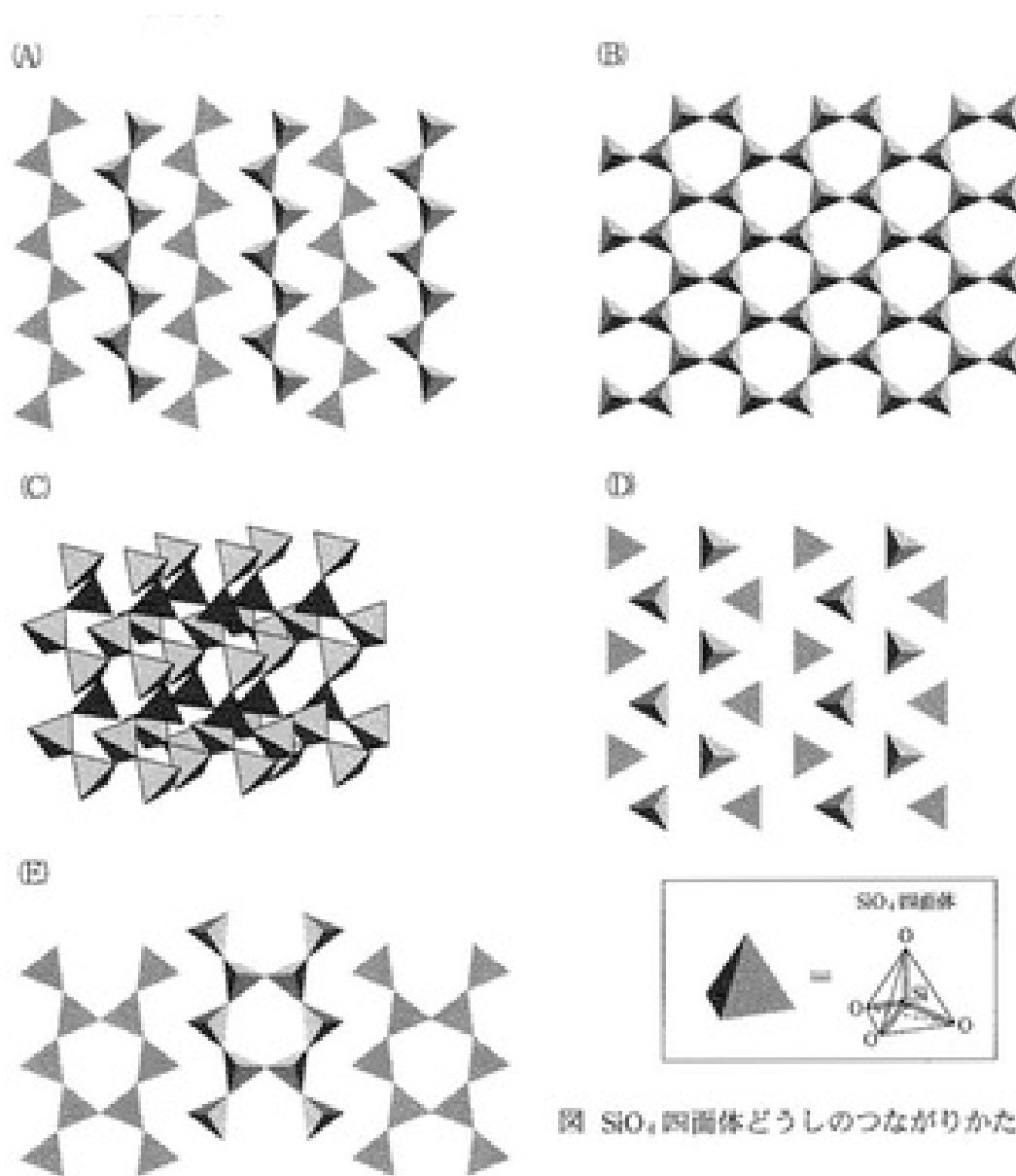


図 SiO₄四面体どうしのつながりかた

常温

应力

弹性变形

塑性变形



破断

脆性破坏

岩石



破断

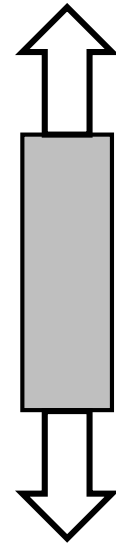
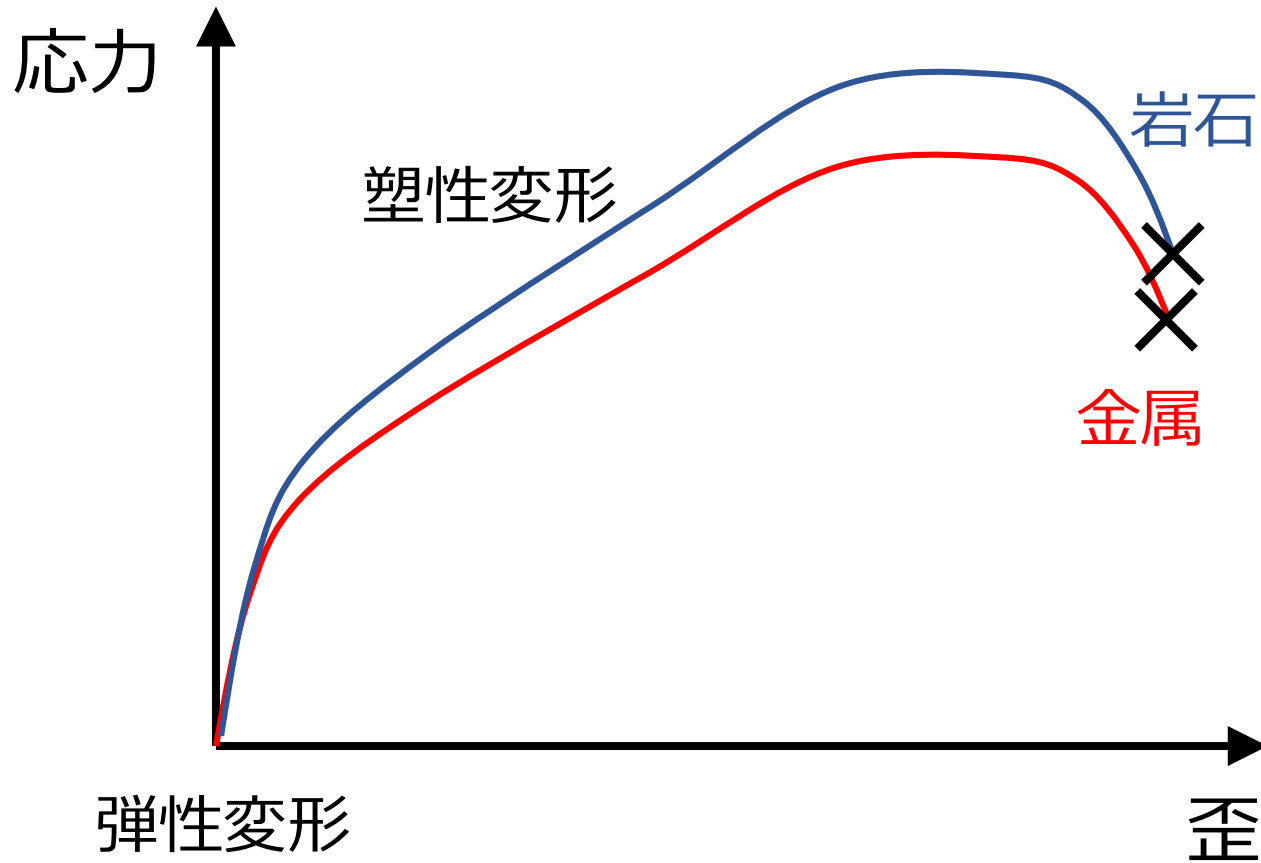
延性破坏

金属

歪



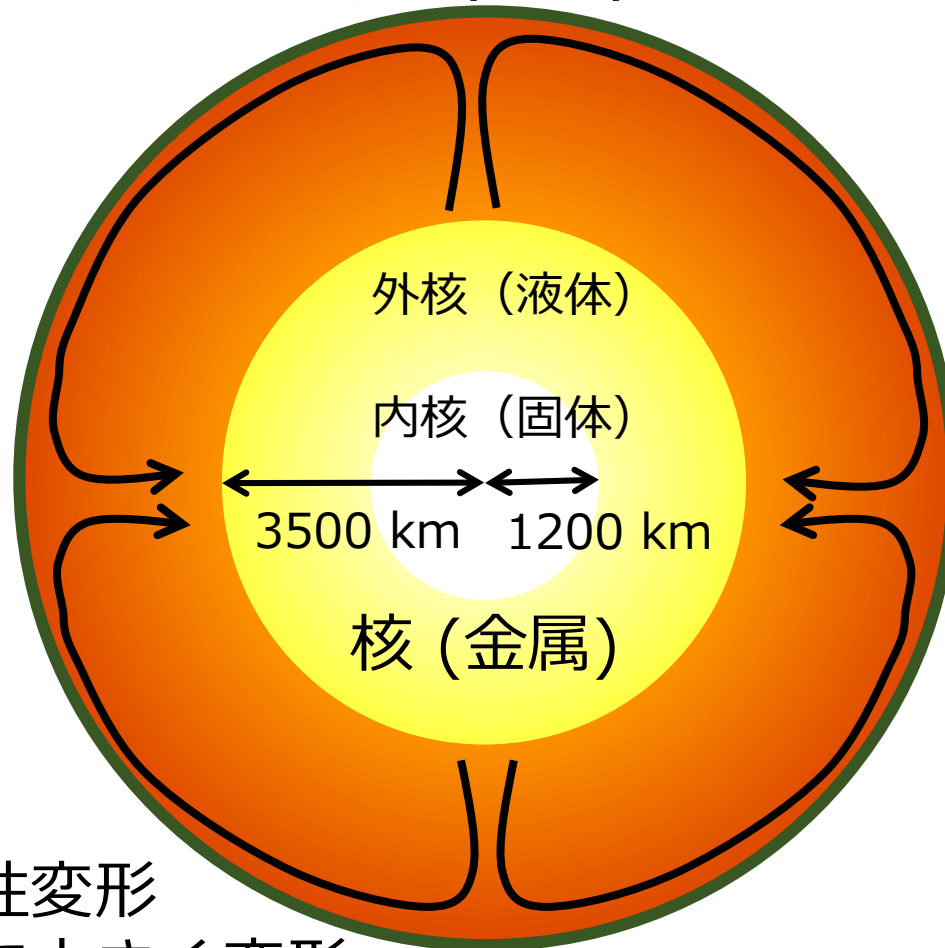
高温では熱振動で原子は動きやすくなる
⇒ 転位は動きやすくなる



地球の内部構造

半径 : 6400 km

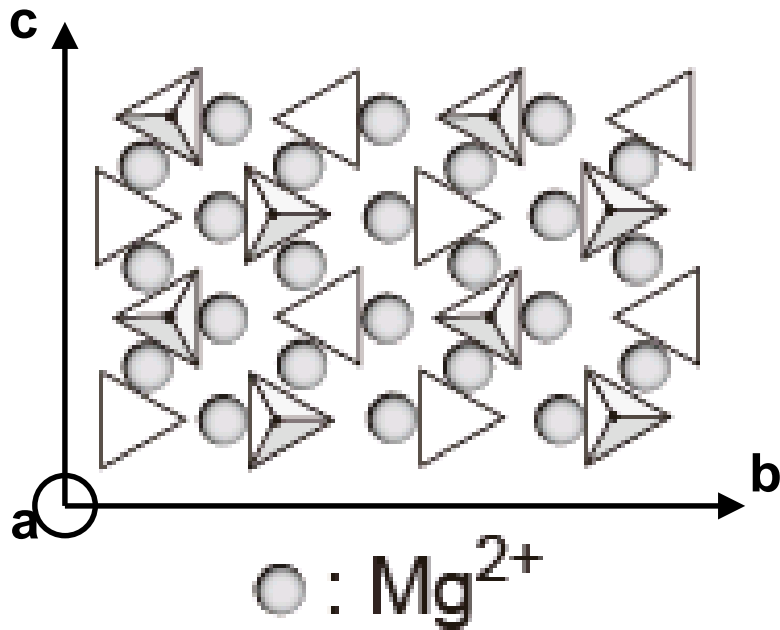
地殻 (岩石) 厚さ : 10~100 km



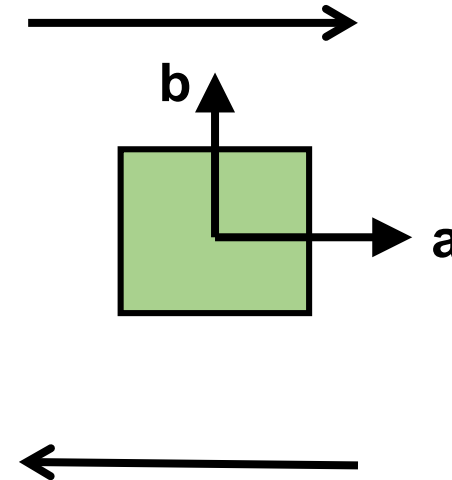
マントルの塑性変形
⇒ 破断せずに大きく変形

大変形 $\Rightarrow$ 鉱物粒子の向きがそろおう

カンラン石 Mg_2SiO_4



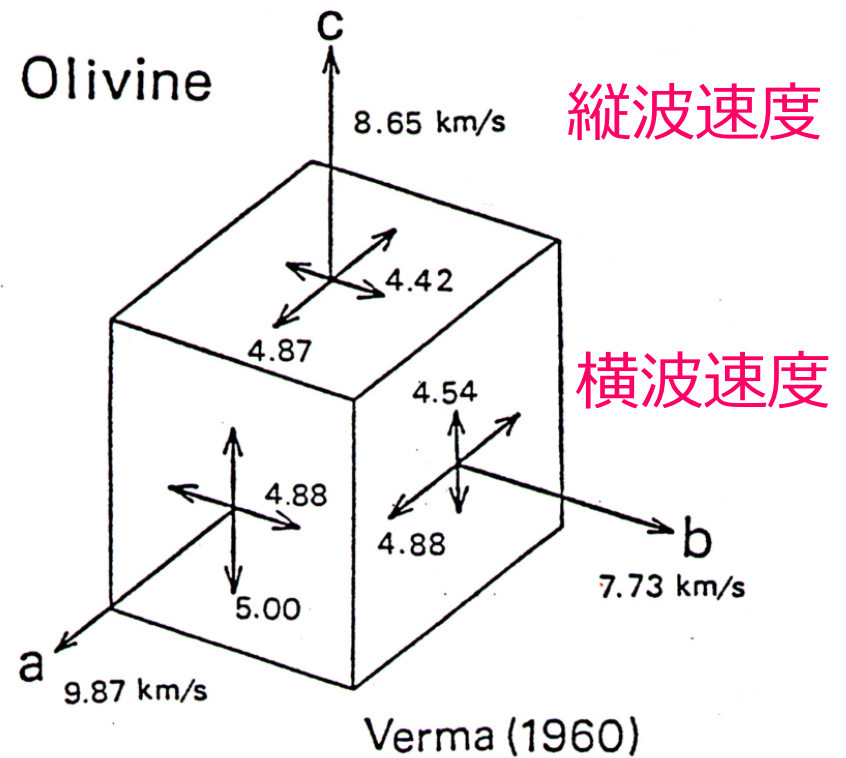
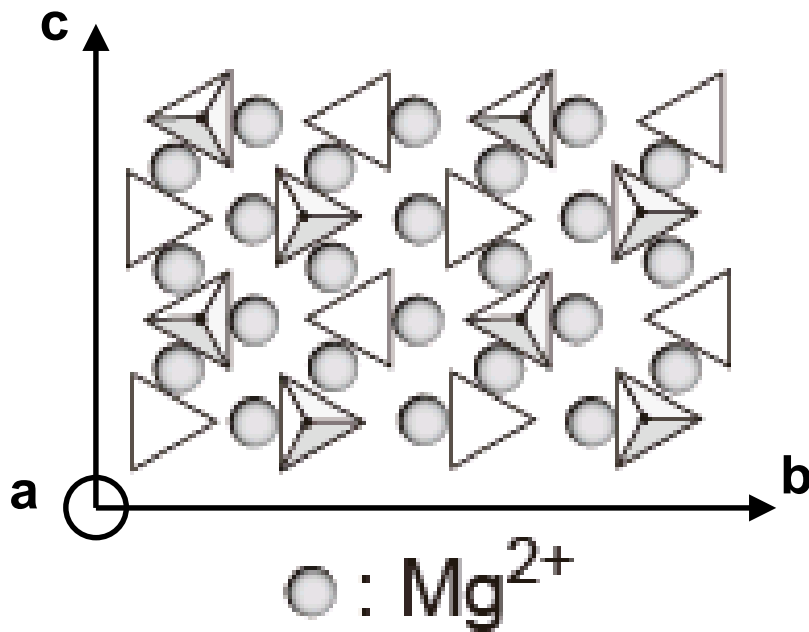
b軸に垂直な面に沿って
a軸方向に滑るのが最も容易



b軸に垂直な面が剪断面に
a軸が流れの方向に

岩石として異方性を示す

カンラン石 Mg_2SiO_4



岩石 多結晶体（鉱物の集合体）

鉱物（結晶）

結晶構造を反映した異方性を示す

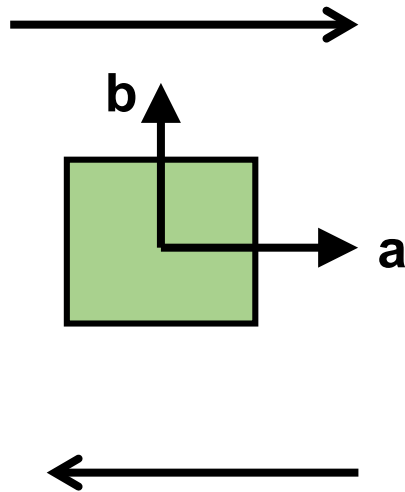
結晶の向きがランダムな場合

⇒ 多結晶体は等方的な性質を示す

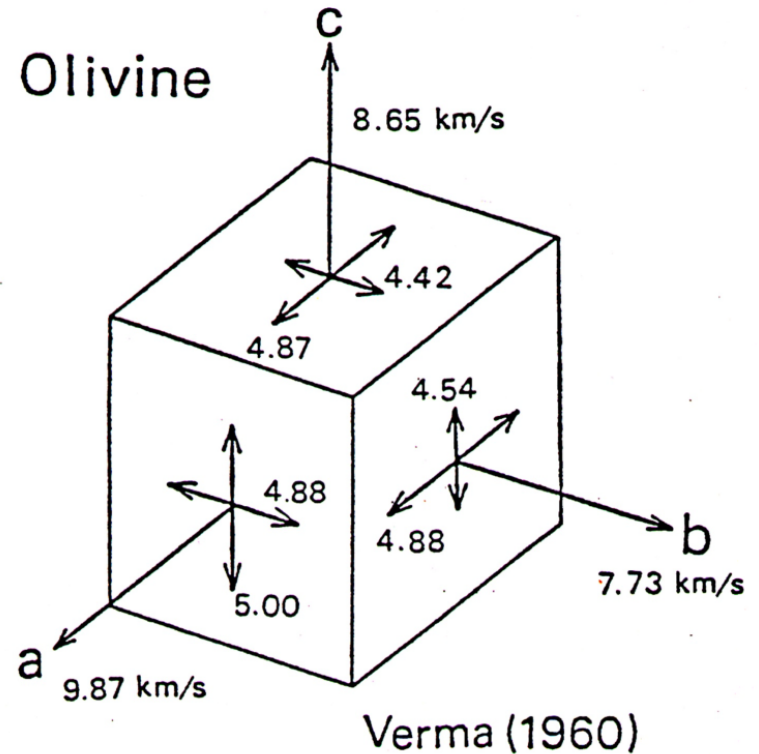
結晶の向きがそろっている場合

⇒ 多結晶体も異方的な性質を示す

流動によって形成される組織



b軸に垂直な面が剪断面に
a軸が流れの方向に

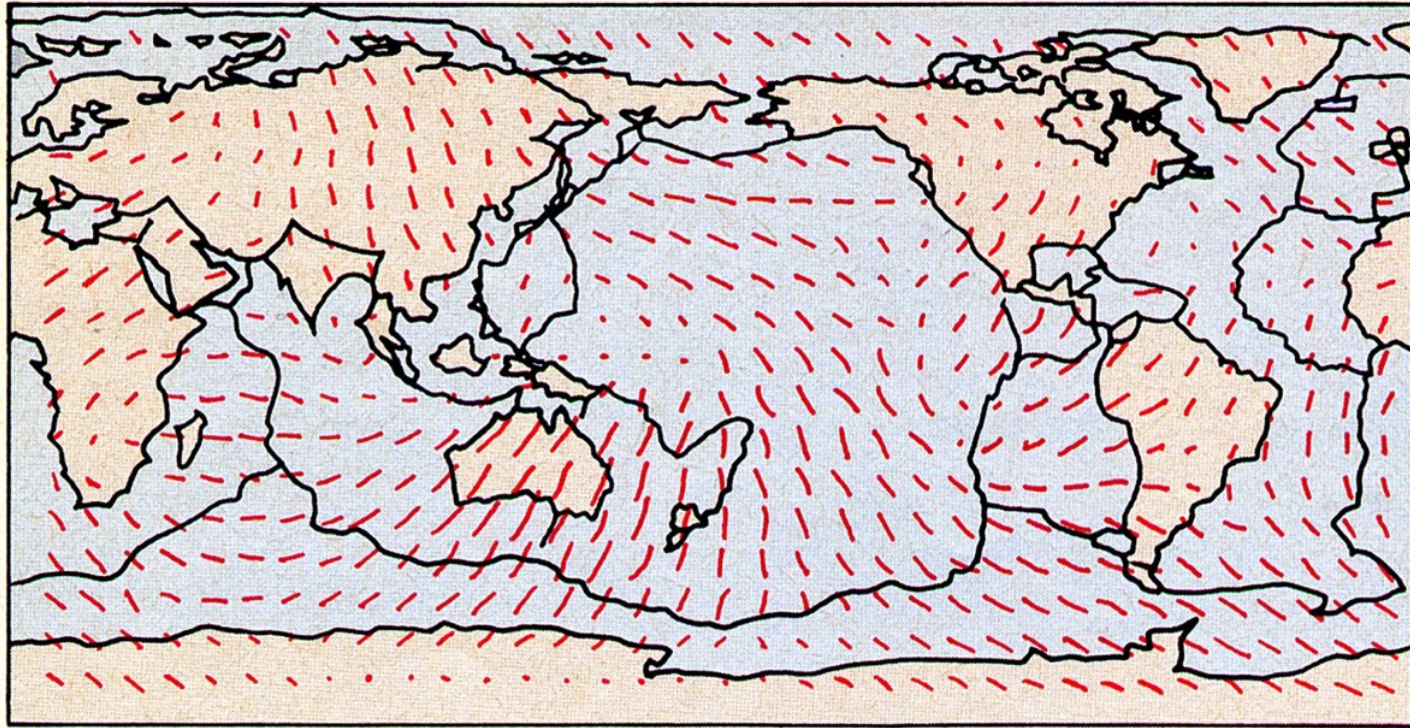


剪断面に垂直な方向: 縦波速度 最低

流れの方向: 縦波速度 最高

異方性の観測例

Tanimoto and Anderson (1984)



— 2 per cent

D=200~400km の縦波速度
の速い方向

期待されるマントル対流のパターンとほぼ一致する

地球の内部構造

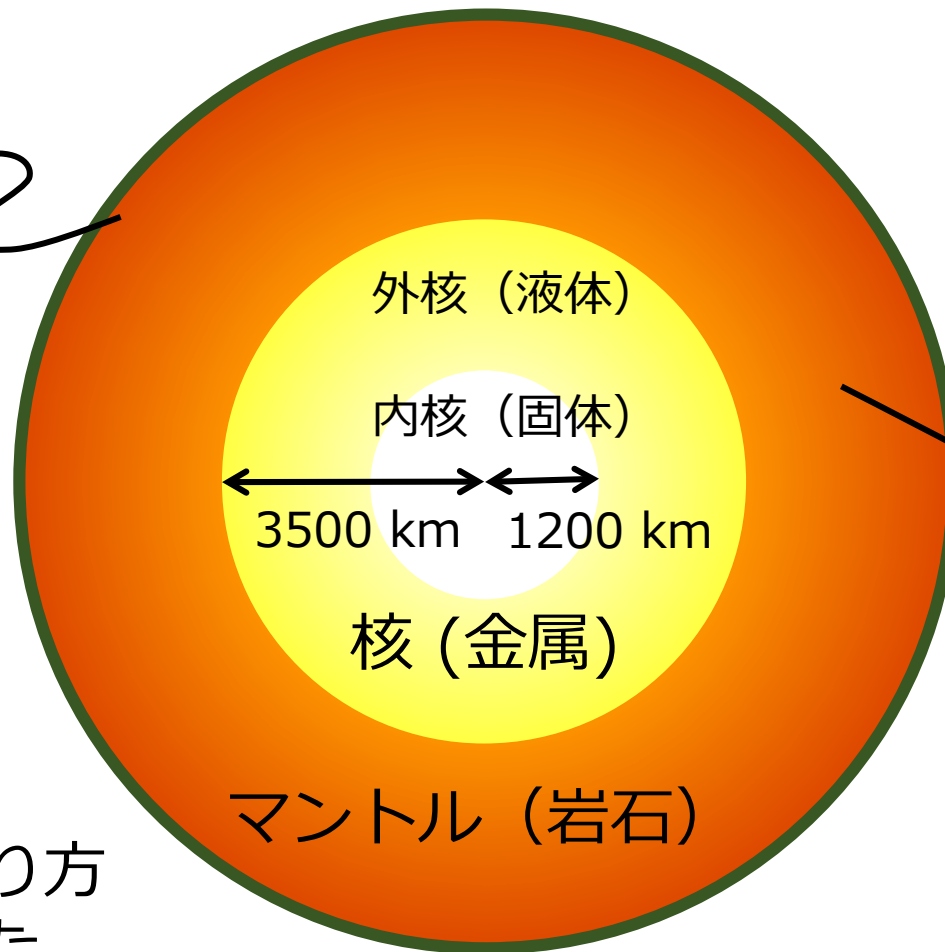
半径 : 6400 km

地殻 (岩石) 厚さ : 10~100 km

地震
⇒ 破壊

地震波
⇒ 弾性変形

内部構造は
地震波の伝わり方
から推定された



マントル対流
⇒ 塑性変形

常温

应力

弹性变形

塑性变形

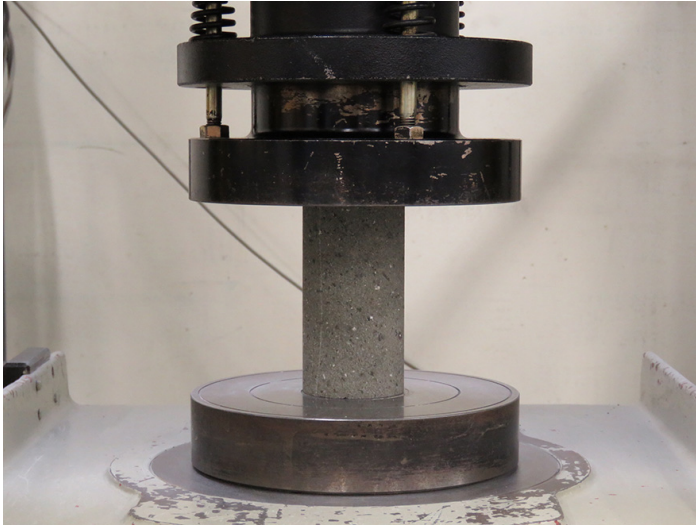
歪

× 破断
脆性破坏
岩石

× 破断
延性破坏
金属



地震：既存のクラックでの滑り

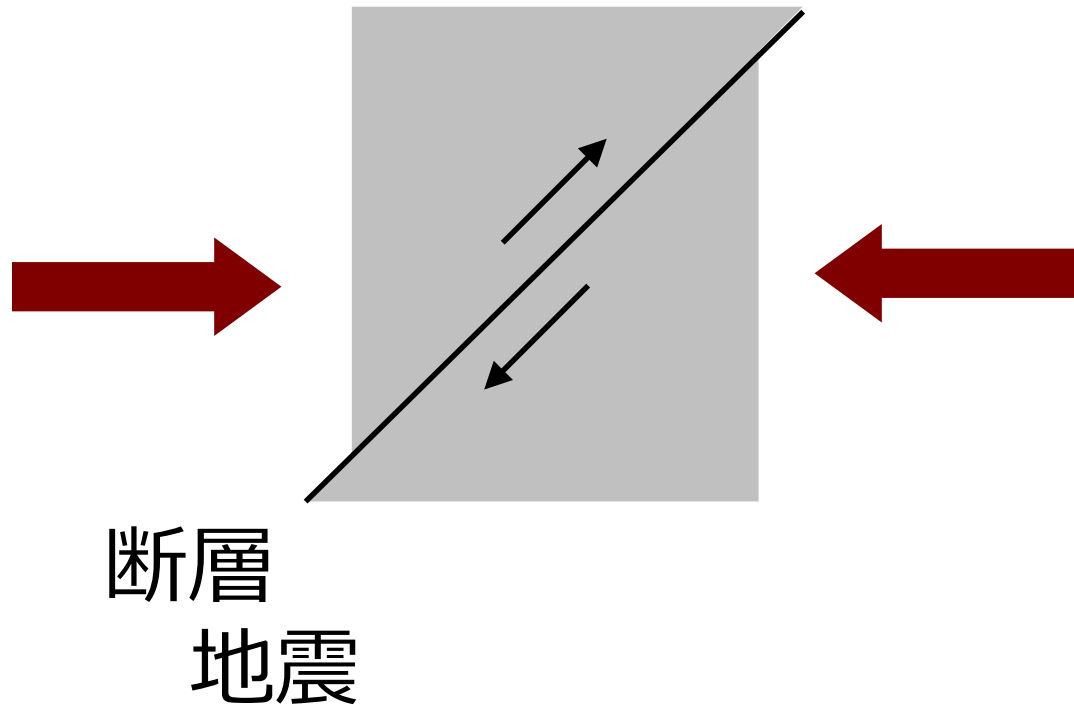


圧縮試験

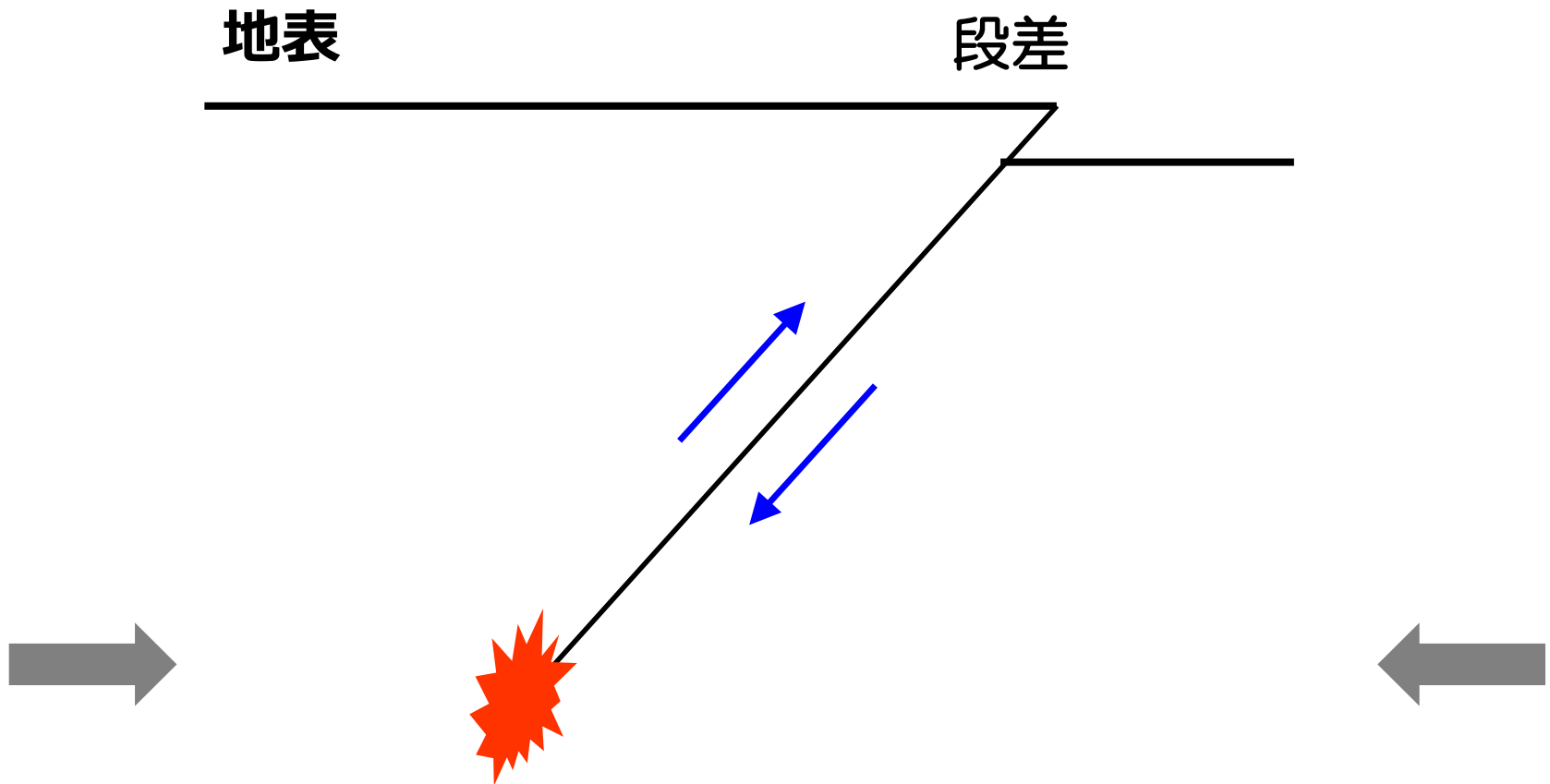


物体に大きな力が働くと

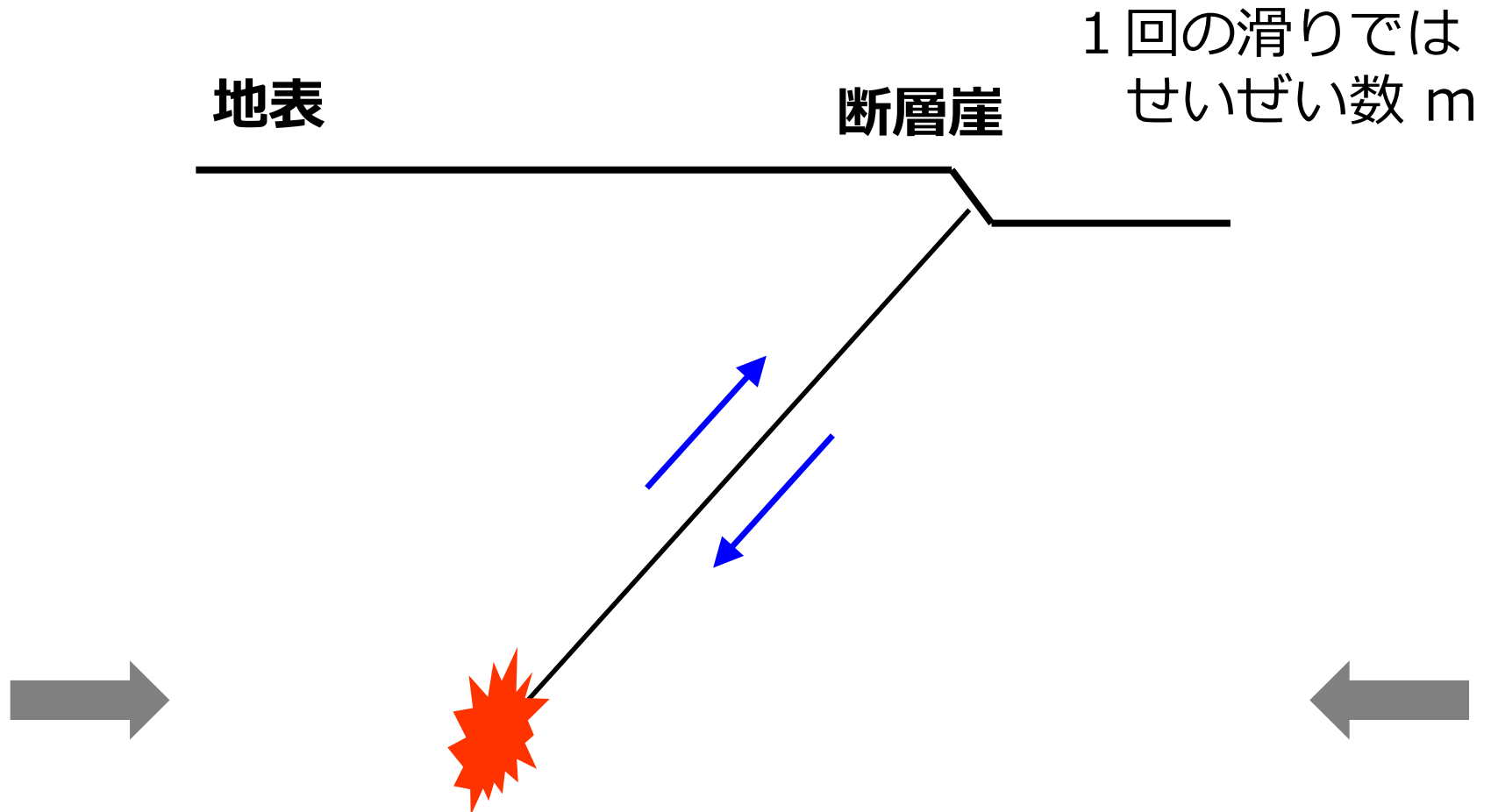
亀裂が入り，それに沿って滑る（破壊）



断層が地表に達すると



断層が地表に達すると

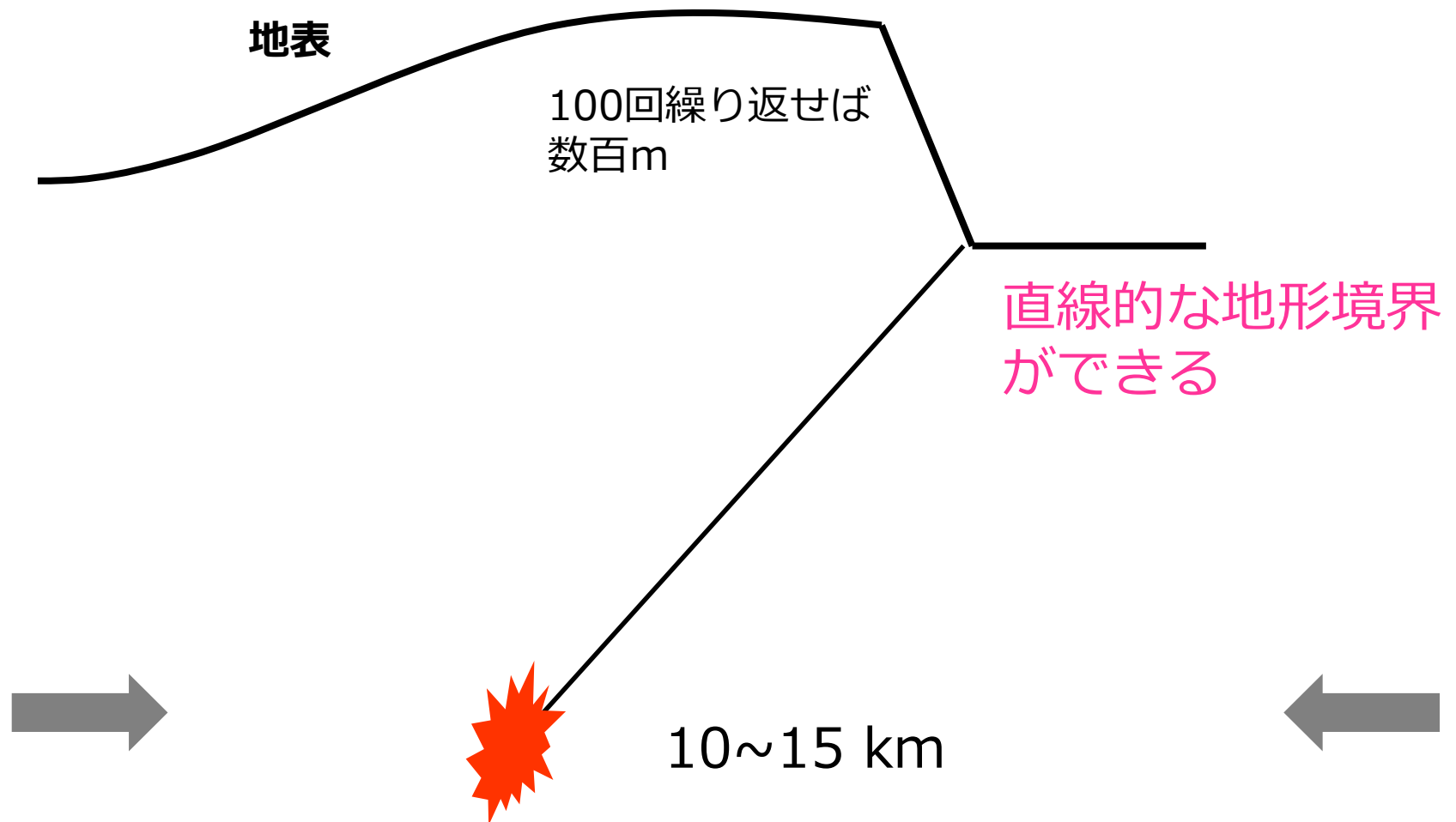


根尾谷断層 (濃尾地震, 1891)

．．．初めて確認された地震断層



地震が繰り返り起きると





Data Japan Hydrographic Association
Image Landsat
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO



邑知潟断層帯

石動断層帯

吳羽山断層帯

森本・富樫
断層帯

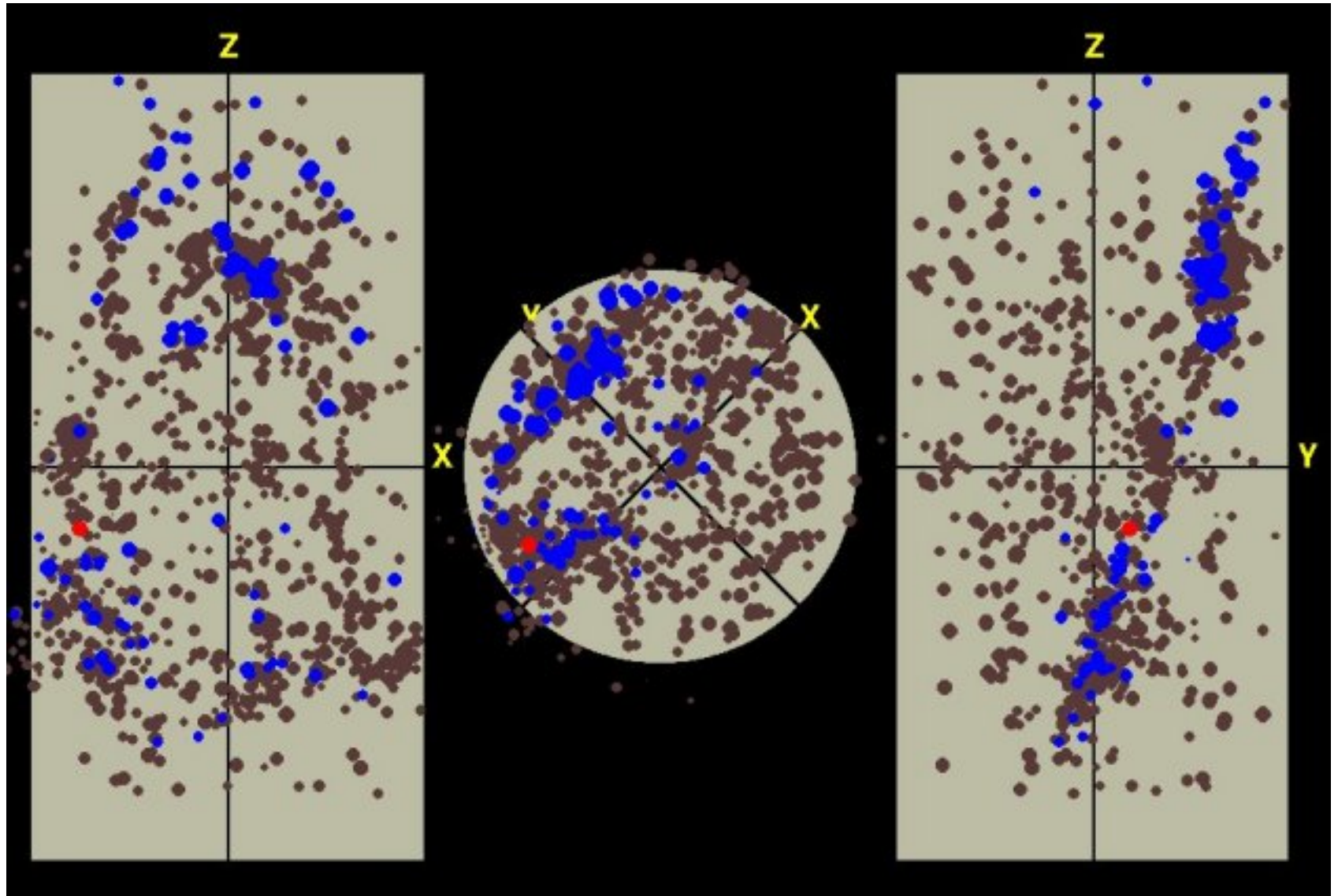
魚津断層帯

清水断層帯

法林寺断層帯

Data Japan Hydrographic Association
Image Landsat
Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO

クラックの発達過程



微小破壊の発生

物性は異方的に

圧縮軸方向では
硬くなる

直交する方向では
軟らかくなる

地震予知に使える？

実際に観測された
例はない

